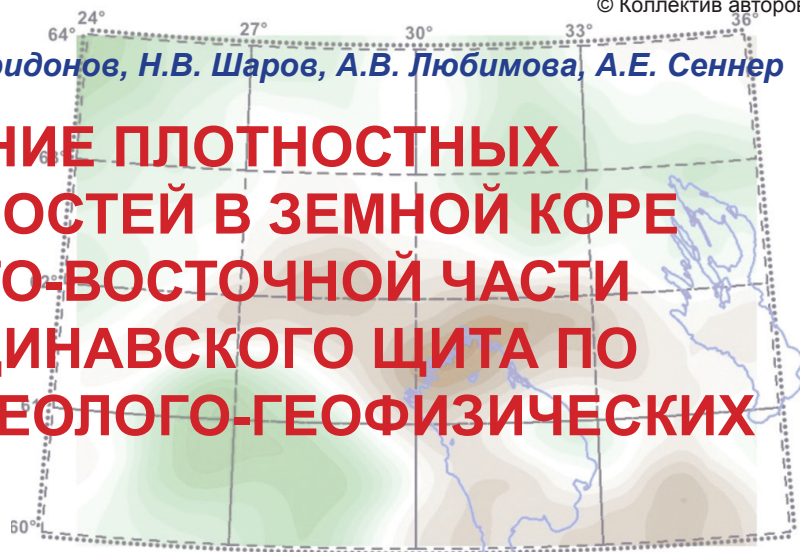


УДК 550.83.016

© Коллектив авторов

Н.Н. Пиманова, В.А. Спиридонов, Н.В. Шаров, А.В. Любимова, А.Е. Сеннер

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И МАНТИИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ



Моделирование геобъектов и геопроцессов

Район работ расположен в юго-восточной части Фенноскандинавского щита. Структурно-геологическая позиция района работ определяется приуроченностью на востоке к Карельскому геоблоку, на западе – к Свекофеннской складчатой области. На изучаемой площади с юго-востока на северо-запад протягивается Ладожско-Ботническая (Раахе-Ладожская) зона разломов, расположенная на границе вышеперечисленных геоблоков (рис. 1).

Целью исследований являлось изучение глубинного строения района работ, в частности анализ регионального распределения плотностных неоднородностей в земной коре и мантии.

При проведении работ использовались материалы площадной гравитационной съемки и сейсмические данные по геотраверсам и региональным профилям.

Изучение глубинного строения проводилось на основе 2D и 3D плотностного моделирования среды. Работа по обработке и интерпретации геолого-геофизических данных велась с применением программных и технологических возможностей ГИС ИНТЕГРО (ВНИГНИ, отделение «Геоинформатики» «ВНИИГеосистем»).

Для построения глубинных границ земной коры в 2D и 3D плотностных моделях нами использовались данные сейсмических исследований. Глубинное строение юго-восточной части Фенноскандинавского щита изучено сейсмическими (ГСЗ, ОГТ) и сейсмологическими методами (МОВЗ) (рис. 1). На основе этих данных ранее рядом авторов [1, 2, 3] были построены карты глубины залегания поверхности Мохо. Однако ни одна из них не покрывает всю территорию исследований. Поэтому на основе карт глубины залегания поверхности Мохо Шарова Н.В. [2] (рис. 2а) и Luosto U. [1] (рис. 2б) нами была построена сводная карта (рис. 2в).

Уточнение этой карты осуществлялось на основе анализа отклонения глубин залегания поверхности

Моховичича на сводной карте и на разрезах по профилям ГСЗ. При построении мелкомасштабных карт неизбежно происходит осреднение данных в пределах отдельных участков сейсмических профилей, что привело на нашей территории к различию глубин залегания Мохо на разрезах ГСЗ и сводной карте до 8 км (рис. 3а). Глубины залегания Мохо на сводной карте были скорректированы к данным по профилям ГСЗ (рис. 3б). Уточненная карта рельефа поверхности Мохо использовалась нами в дальнейшем для работы.

Полученные данные позволили оценить вклад рельефа поверхности Мохо в наблюдаемое гравитационное поле. Для этого была построена двухслойная 3D модель, включающая в качестве плотностных слоев: земную кору (плотность 3,0 г/см³) и мантию (плотность 3,3 г/см³) (рис. 4а).

Поле от этой модели, рассчитанное в результате решения прямой задачи, существенно отличается от региональной составляющей наблюдаемого гравитационного поля. Рассчитанный гравитационный эффект от рельефа поверхности Мохо в северо-западной части площади характеризуется отрицательной аномалией поля, а в юго-западной – положительной. Граница между ними имеет преимущественно северо-восточное простирание. Региональная составляющая наблюдаемого гравитационного поля имеет повышенные значения в широкой полосе северо-западного простирания, а области с повышенными и пониженными значениями регионального поля приурочены к аномалиям модельного поля противоположного знака.

С другой стороны, более детальный анализ, проведенный при совмещении карты глубины залегания поверхности Мохо и регионального гравитационного поля, обнаруживает тесную связь, но несколько другого плана (рис. 5): для района работ отмечается *пространственное совпадение* положения

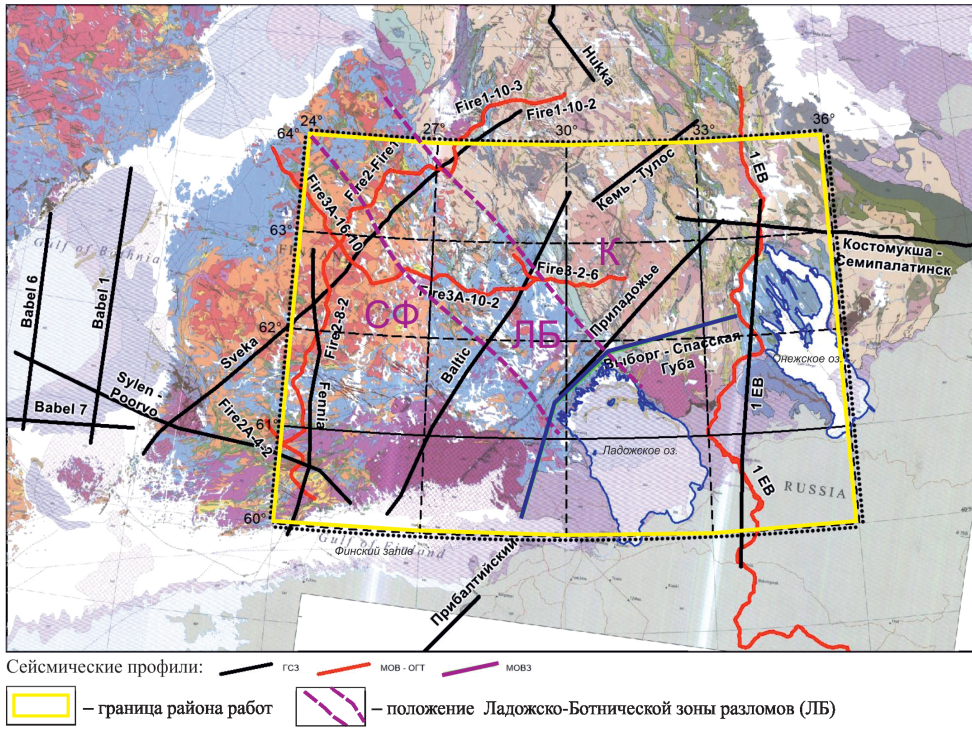


Рис. 1. Район работ и его изученность сейсмическими профилями на фоне геологической карты (GSF). Основные тектонические структуры: К – Карельский блок, СФ – Свекофеннская складчатая область, ЛБ – Ладожско-Ботническая зона разломов

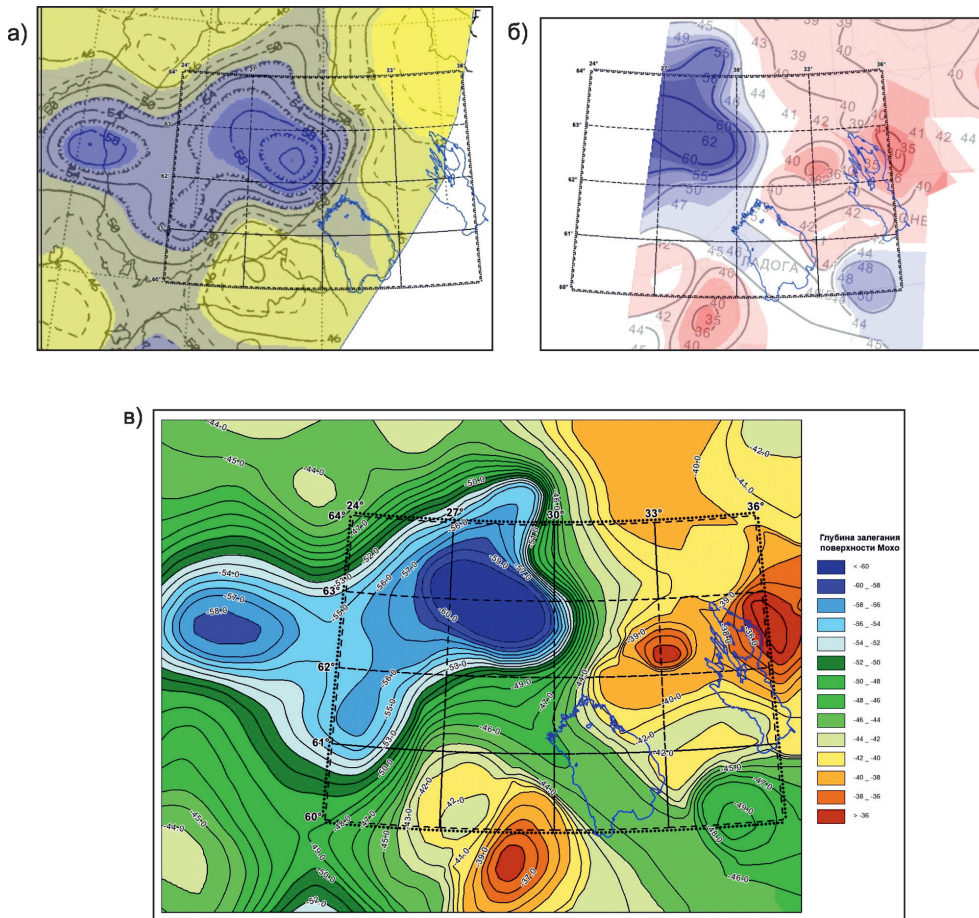


Рис. 2. Построение сводной карты глубины залегания поверхности Моховоричича: а) – карта рельефа Мохо (Luosto U., 1996), б) – карта рельефа Мохо (Шаров Н.В., 2004), в) – сводная карта глубины залегания поверхности Мохо

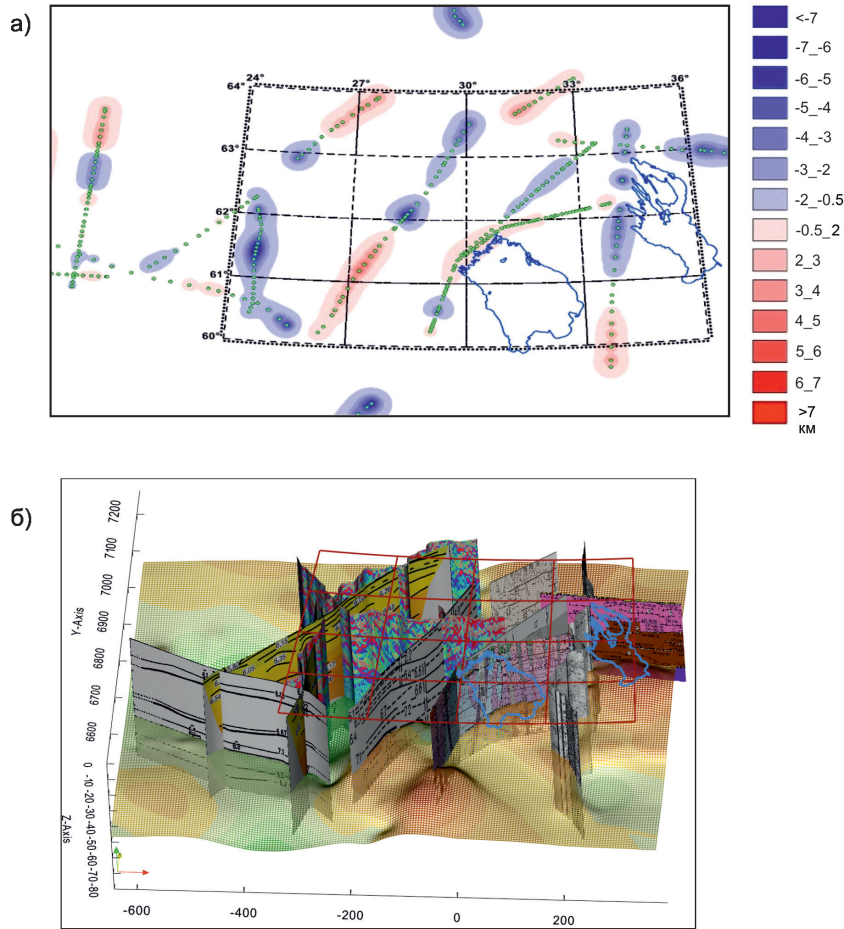


Рис. 3. Уточнение карты глубины залегания поверхности Мохо: а) – невязка между глубиной залегания поверхности Мохо на сводной карте и на профилях ГСЗ, б) – уточненный рельеф поверхности Мохо, совмещенный с сейсмическими разрезами по профилям ГСЗ

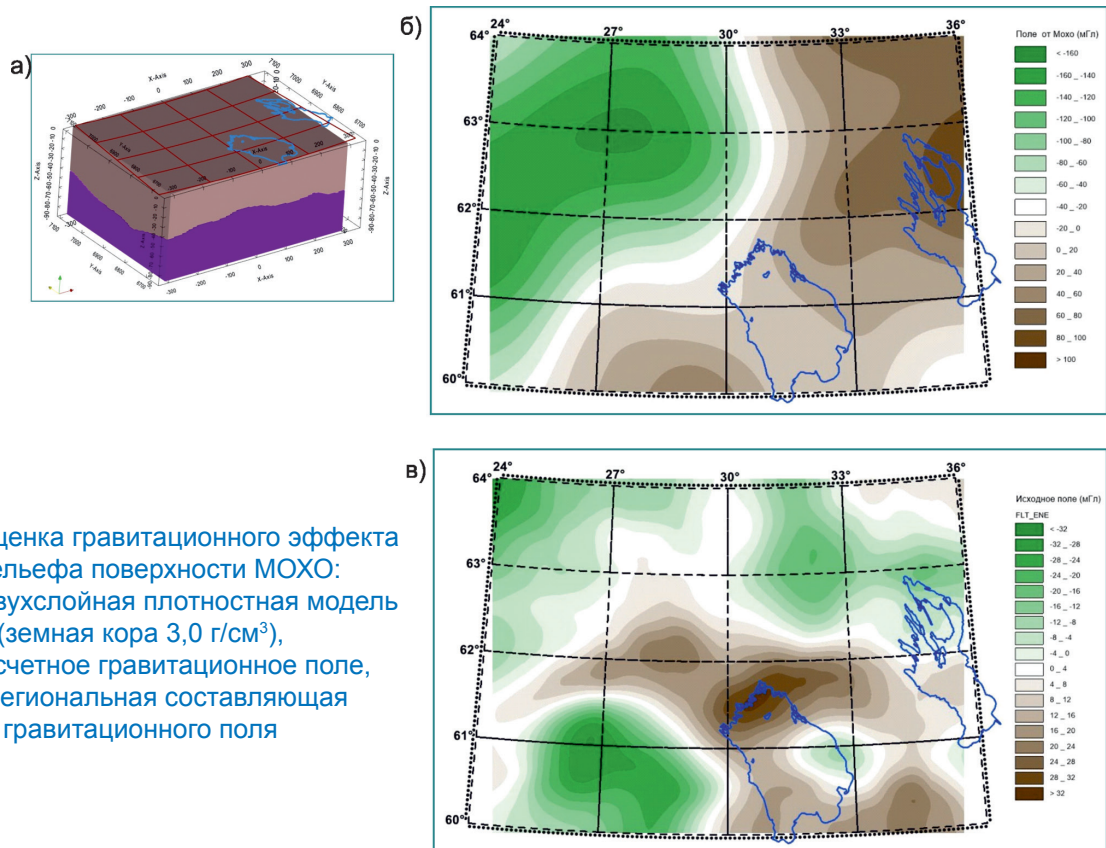


Рис. 4. Оценка гравитационного эффекта от рельефа поверхности МОХО: а) – 3D двухслойная плотностная модель (земная кора $3,0 \text{ г/см}^3$), б) – расчетное гравитационное поле, в) – региональная составляющая гравитационного поля

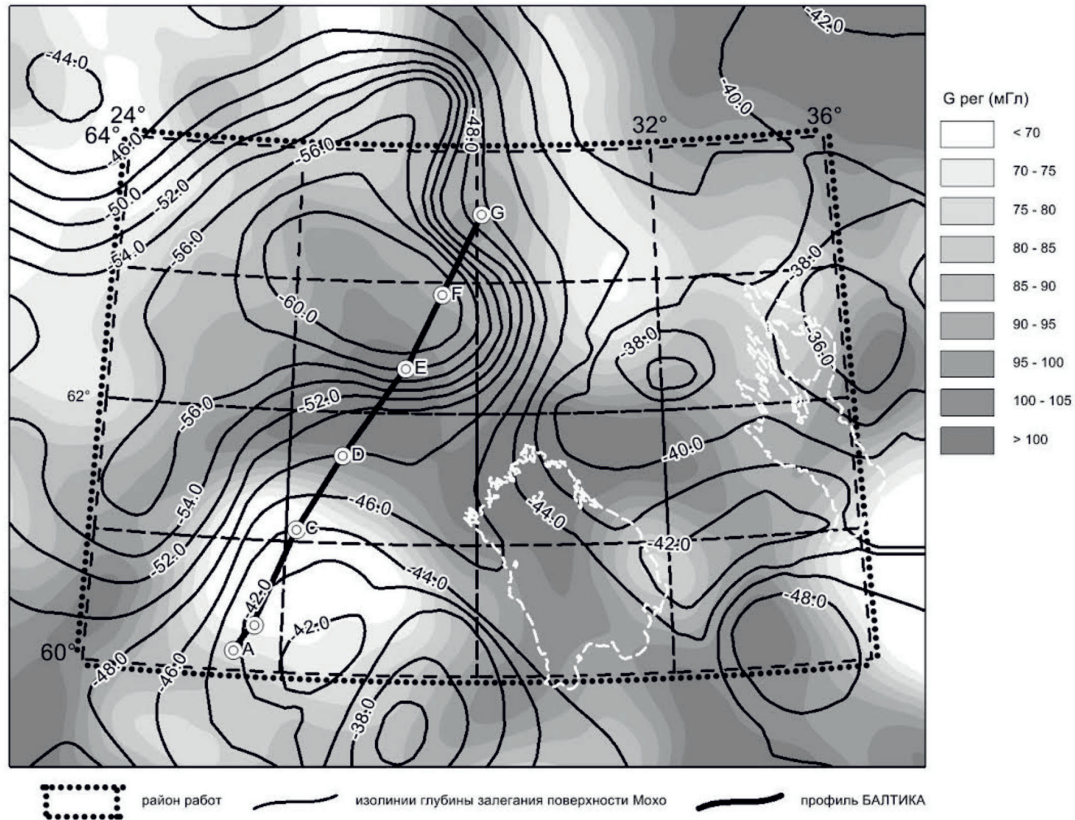


Рис. 5. Сопоставление рельефа поверхности Мохо (изолинии) и региональной составляющей гравитационного поля

аномалий регионального гравитационного поля и отдельных особенностей рельефа Мохо. Границы аномалий регионального гравитационного поля (гравитационных ступеней) и участки перепада рельефа поверхности Мохо преимущественно совпадают. На рис. 6 (а, б, в) показаны области с различными соотношениями рельефа поверхности Мохо и уровня наблюдаемого гравитационного поля.

Сравнение положения выделенных областей и тектонических блоков позволяет сделать вывод, что последние характеризуются разными типами корреляционной связи между рельефом поверхности Мохо и уровнем наблюдаемого гравитационного поля (рис. 6г). В пределах Карельского блока их корреляция прямая, то есть впадинам рельефа поверхности Мохо соответствует понижение гравитационного поля, а его поднятия – повышение. Для Свеккофенской области и Ладожско-Ботнической зоны наблюдается инверсия аномалий регионального гравитационного поля относительно глубины залегания Мохо: выступам поверхности Мохо соответствуют минимумы гравитационного поля, а впадинам – максимумы. Пограничная Ладожско-Ботническая зона, расположенная между ними, выделяется положительной аномалией гравитационного поля и повышением мощности земной коры.

Объяснить такое поведение гравитационного поля в районах с обратной корреляционной связью между анализируемыми параметрами можно пониженной плотностью земной коры в районе выступов поверхности Мохо и повышением значений плотности при увеличении глубины залегания Мохо. Из этого следует, что земная кора исследуемой площади сложена блоками, неоднородными по плотности.

Распределение параметров этих плотностных неоднородностей было оценено в двумерном варианте (для одного из сейсмических профилей) и на основе 3D плотностного моделирования.

Для 2D моделирования распределения плотности в земной коре был выбран сейсмический профиль Балтик, который пересекает площадь работ с юго-запада на северо-восток (рис. 1, 5). На юге он пересекает Выборгский гранитоидный массив, положение которого в рельефе поверхности Мохо отмечается выступом до 36–40 км, на севере – Ладожско-Ботническую зону, где наблюдается углубление поверхности Мохо до 60–64 км (рис. 5). По всему профилю отмечается обратная корреляция между рельефом Мохо и наблюдаемым гравитационным полем (рис. 6).

При построении плотностной модели по профилю Балтик глубинные границы задавались

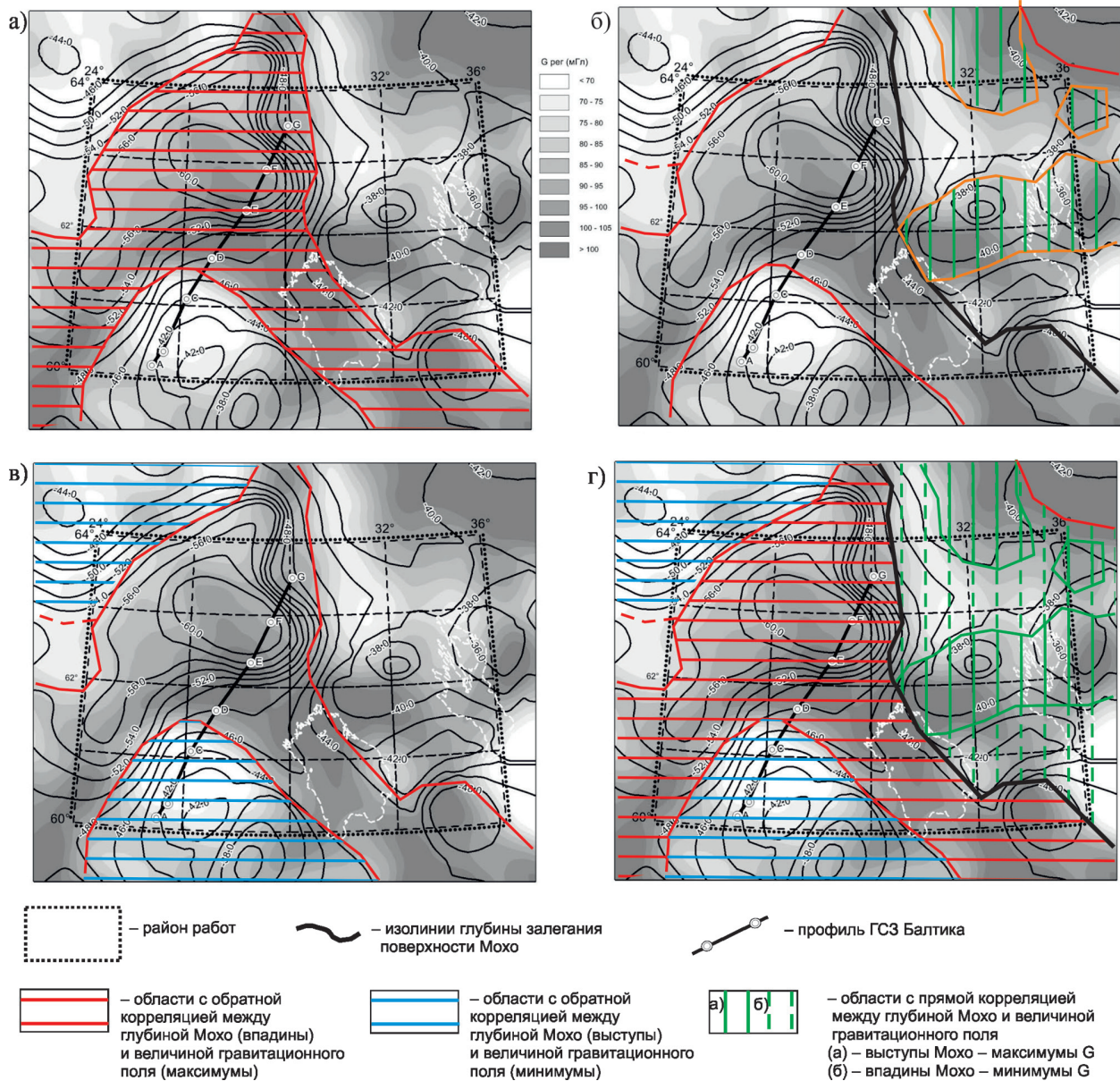


Рис. 6. Области с разным соотношением глубины залегания поверхности Мохо и величиной региональной составляющей гравитационного поля

по сейсмическим данным, а плотность была пересчитана из скорости по формуле:

$$\sigma = 0,25 V_p + 1,2,$$

где σ – плотность, V_p – скорость продольных волн.

Решение прямой задачи от полученного плотностного разреза (рис. 7б) показывает существенное расхождение между расчетным и наблюдаемым гравитационными полями (рис. 7).

Подбор плотностного разреза адекватного наблюдаемому гравитационному полю на первом этапе включал определение на южном участке профиля вклада в гравитационное поле отдельных аномалообразующих объектов: Выборгского гранитоидного массива и рельефа поверхности Мохо. Моделирование должно было ответить на вопрос: может ли изменение параметров (мощности, плотности)

гранитоидного массива, создающего отрицательную аномалию гравитационного поля, скомпенсировать положительную аномалию от поднятия поверхности Мохо и обеспечить наблюдаемое в этой части профиля понижение наблюдаемого гравитационного поля?

Для гранитоидного массива при моделировании рассматривалось два варианта с разной их мощностью и плотностью (рис. 8а, б). Оба варианта позволяют получить отрицательную аномалию гравитационного поля до 30 мГал и скомпенсировать имеющееся в этом районе понижение наблюдаемого гравитационного поля. Однако гравитационный эффект от выступа поверхности Мохо в этом районе, создающий положительную аномалию до 90 мГал (рис. 8в), существенно больше, и поле, создаваемое гранитным массивом, его не компенсирует.

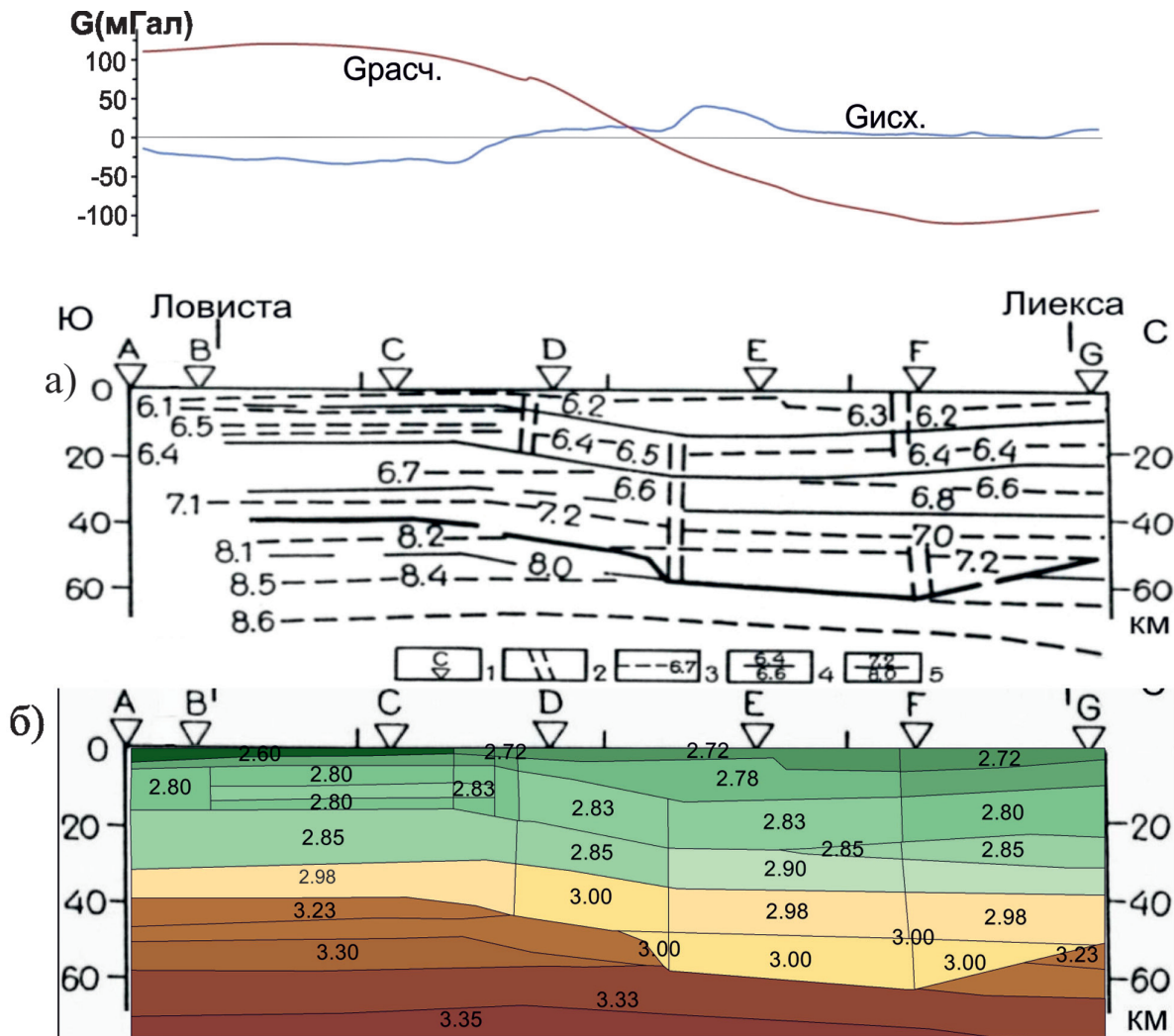


Рис. 7. Скоростной (а) и плотностной (б) разрезы по сейсмическому профилю Балтик (Luosto, Tiira et al., 1990; Шаров, 1993; Mitrofanov et al., 1998).

1 – пункты взрыва; 2 – глубинные разломы; 3 – преломляющие границы с граничными скоростями (км/с); 4 – отражающие границы с характеристикой скорости (км/с); 5 – граница М, построенная по отраженным и преломленным волнам, с характеристикой скорости (км/с)

Для получения гравитационного эффекта от разреза земной коры, сопоставимого по амплитуде с наблюдаемым полем, необходимо дополнительно предполагать сильное разуплотнение земной коры под гранитоидным массивом и задавать повышенную плотность всех разделов земной коры в соседнем, северном блоке, отвечающем Ладожско-Ботнической зоне. Такое распределение плотности в разрезе земной коры по профилю Балтик получено нами в результате подбора, один из вариантов которого представлен на рис. 9.

В подобранном плотностном разрезе наблюдается резкое изменение плотности по латерали, что противоречит скоростному разрезу по профилю ГСЗ Балтик (рис. 7а), который характеризуется слабым изменением скоростей вдоль глубинных слоев. Кроме того, на южном участке подобранного разреза плотность нижней коры 2,88 г/см³, средней – 2,76 г/см³,

что существенно ниже плотностей, полученных на основе корреляционной связи плотности и скорости, и предполагает процессы гранитизации на всю глубину коры, в то время как северный блок в верхней части разреза (на глубине до 20 км) имеет несколько завышенные плотности (до 2,88 г/см³). Поэтому предположение при подборе о расположении аномальных масс не только в земной коре, но также и в мантии позволило бы сделать плотностной разрез земной коры по профилю Балтик менее контрастным.

Для подтверждения предположения о латеральной неоднородности мантии было проведено решение 3D обратной задачи гравirazведки до глубин 100-150 км в двух вариантах: без учета априорных данных (решение обратной задачи с использованием спектральных преобразований) и с учетом информации о рельефе поверхности Мохо (методом подбора).

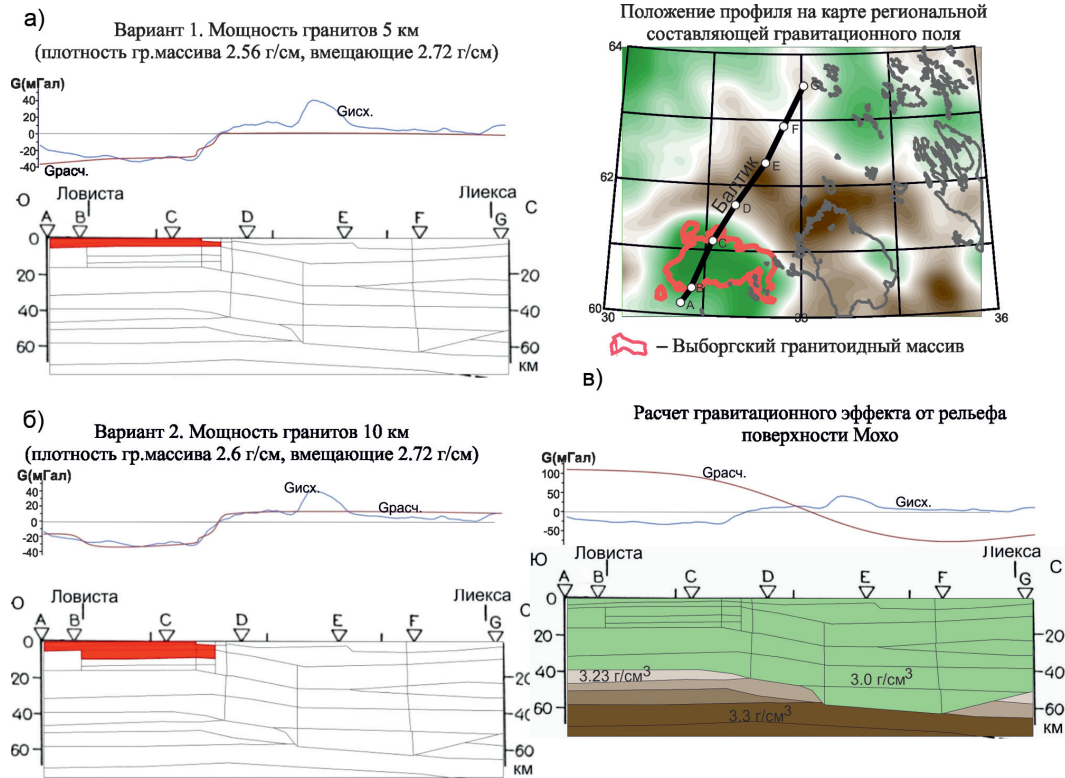


Рис. 8. Оценка гравитационного эффекта от гранитоидного массива (а, б) и рельефа поверхности Мохо (в) по профилю БАЛТИК

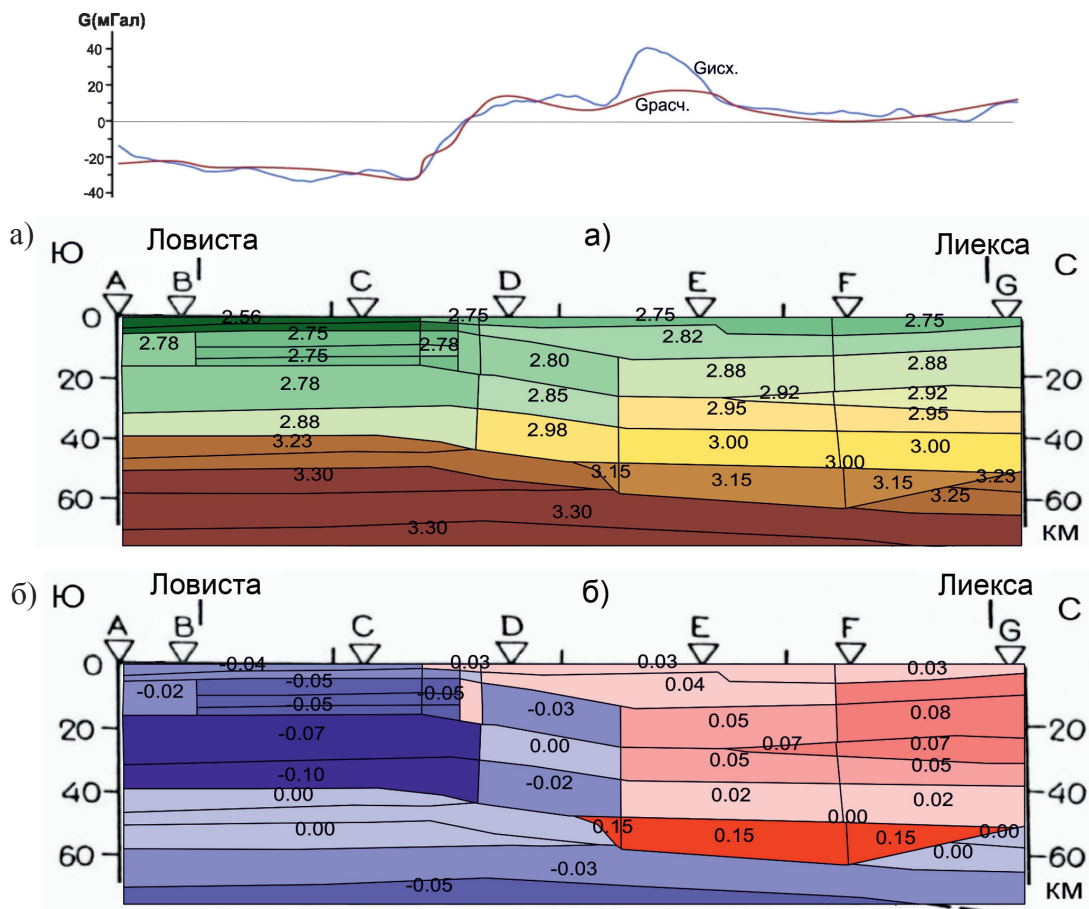


Рис. 9. Вариант подобранной плотностной модели по профилю ГСЗ БАЛТИК: а) – подобранный плотностной разрез, б) – значения изменений плотности в результате подбора

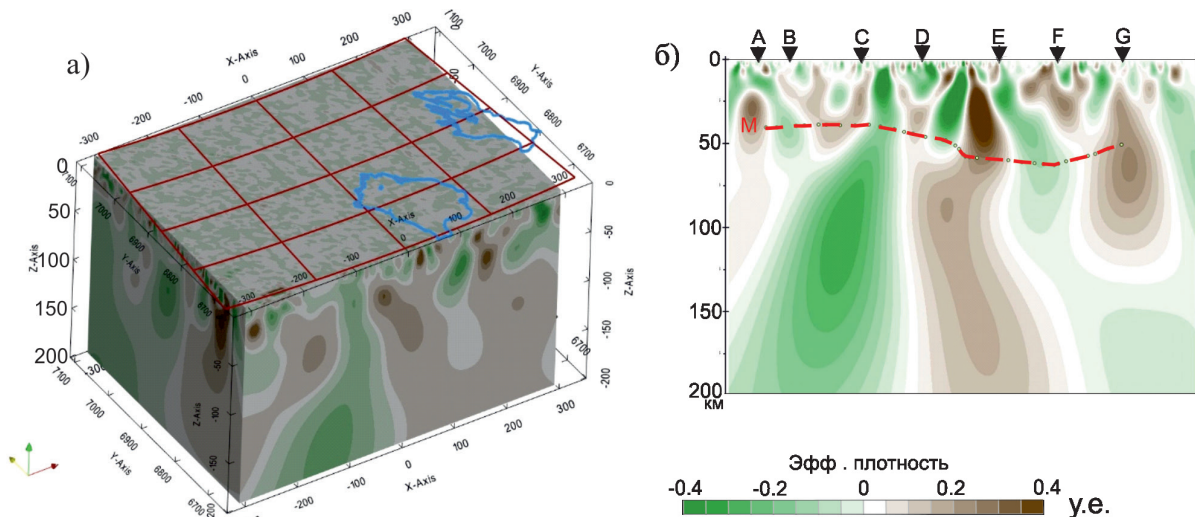


Рис. 10. Распределение плотностных неоднородностей в земной коре и мантии, полученное в результате решения обратной задачи с использованием спектральных преобразований:
 а) – 3D распределение эффективной плотности,
 б) – сечение 3D распределения эффективной плотности по профилю Балтик

В первом случае было рассчитано 3D распределение эффективной плотности (рис. 10а) до глубины 200 км. Его анализ показывает, что на глубинах ниже поверхности Мохо среда неоднородна. Здесь присутствуют как области разуплотнения, так и повышенной плотности. Полученное 3D распределение эффективной плотности в мантии согласуется с распределением скоростей на больших глубинах (50-400 км) [4]. В частности, область пониженных скоростей пространственно совмещается с областями пониженной эффективной плотности (рис. 11).

Сечение по профилю Балтик 3D распределения эффективной плотности содержит на глубинах ниже поверхности Мохо разуплотнение в южной части разреза (под Выборгским гранитоидным массивом) и более плотную мантию севернее его (рис. 10б).

Во втором случае проведенный 3D подбор плотностей для стартовой двухслойной модели (земная кора/мантия) также показывает, что соответствие расчетного поля от 3D плотностной модели наблюдаемому гравитационному полю обеспечивают плотностные неоднородности, расположенные как в земной коре, так и ниже поверхности Мохо (рис. 12а).

В сечении подобранной 3D модели по профилю ГСЗ Балтик видны два крупных блока в мантии: в южной части – с дефицитом плотности и в северной части – с избытком (рис. 12б).

Для сейсмического разреза по профилю ГСЗ Балтик подбор плотностной модели с учетом расположения аномалообразующих объектов как в земной коре, так и мантии позволил получить для южного и северного участков разреза плотности глубинных

слоев, в большей мере отвечающие современным представлениям о их составе (рис. 12в).

Выводы: сопоставление глубины залегания поверхности Мохо и регионального гравитационного поля позволило сделать заключение, что основные тектонические структуры района работ – Карельский блок и Свекофеннская складчатая область – различаются по типу их корреляционной связи.

2D и 3D плотностное моделирование показало, что компенсировать наблюдаемое гравитационное поле нужно за счет учета крупных плотностных неоднородностей не только в земной коре, но и в мантии.

Ключевые слова: комплексная обработка, гравиразведка, 3D плотностная модель, профиль ГСЗ Балтик, глубинное строение, Фенноскандинавский щит, Карельский блок, Свекофеннская складчатая область.

ЛИТЕРАТУРА

1. Luosto U. Structure of Earth's Crust in Fennoscandia as Revealed from Refraction and Wide-Angle Reflection Studies // *Geophysica*. – 1997. – 33(1). – С. 3-16.
2. Шаров Н.В. Глубинные сейсмические исследования в юго-восточной части Фенноскандинавского щита // *Геофизический журнал*. – 2015. – Т. 37, № 5. – С. 104-120.
3. Grad M., Tiira T., ESC Working Group. The Moho depth map of the European Plate // *Geophysical Journal International*. – 2009. – 176. – С. 279-292.
4. Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Структура низкоскоростных областей в мантии Северной Европы // *Труды Карельского научного центра РАН*. – 2015. – № 7. – С. 106-126.

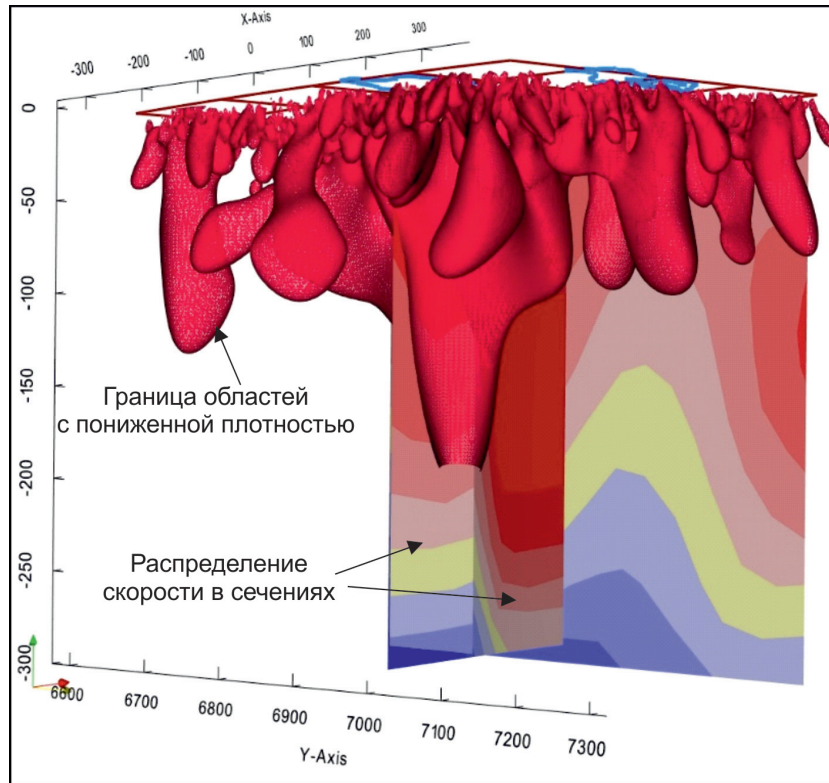


Рис. 11. Сопоставление плотностных неоднородностей (по результатам решения обратной задачи с использованием спектральных преобразований) и распределения скоростей в земной коре и мантии (по результатам сейсмической томографии)

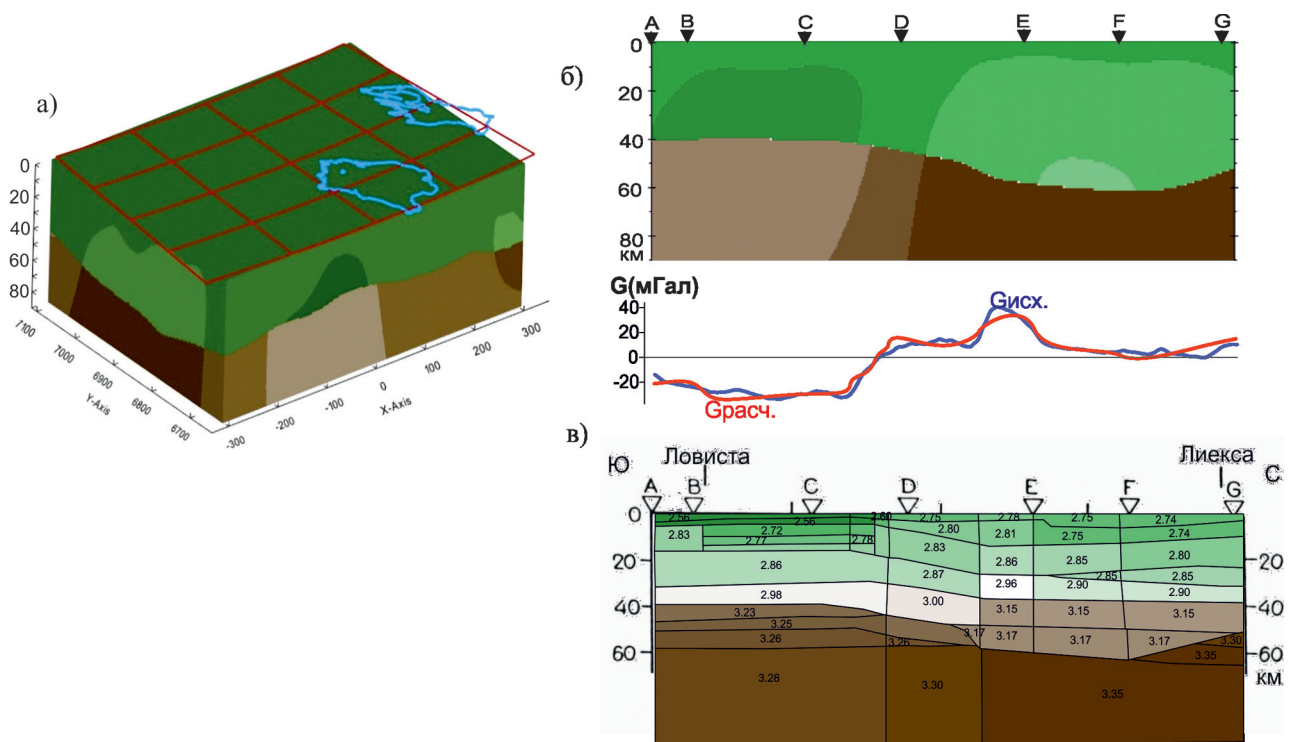


Рис. 12. Распределение плотностных неоднородностей в земной коре и мантии по результатам решения 3D обратной задачи гравиразведки для двухслойной модели методом формализованного подбора: а) – 3D распределение плотностных неоднородностей, б) – сечение 3D распределения плотностных неоднородностей по профилю Балтик, в) – вариант подбора плотностного разреза по профилю Балтик с учетом распределения неоднородностей в земной коре и мантии